

УДК. 621. 771. 014

М. Н. ШТОДА**ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ КРУГЛЫХ ПОЛОС В ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ С ЗАДНИМ НАТЯЖЕНИЕМ**

В статье приведены лабораторные исследования с использованием круглых алюминиевых и свинцовых полос. Диаметр заготовок составлял 6,5 мм, а диаметр валков стана – 210 мм. Прокатка осуществлялась в овальном калибре шириной 8,8 мм. Во время прокатки создавалось заднее натяжение различной величины. Для создания разных режимов трения в очаге деформации заготовки прокатывались с сухой поверхностью, а также с покрытием мылом или мелом. Экспериментальные данные обрабатывались методами статистического анализа. Результаты исследований показывают, что условия трения в очаге деформации при прокатке круглых полос в овалных калибрах независимо от режима натяжения и прокатываемого материала существенно влияют на величину поперечной деформации металла. Во всех исследуемых случаях, снижение коэффициента трения вызывает снижение уширения, а повышение коэффициента трения – увеличивает поперечное течение металла в очаге деформации. Прокатка свинцовых и алюминиевых круглых полос, покрытых мылом, в овальном калибре протекала с однозонным очагом деформации, то есть при отрицательных значениях опережения. При этом известные формулы для расчета абсолютного уширения не работают, так как все они выведены для условия наличия зоны опережения. Предлагаемая модель учитывает возможность прокатки в овальном калибре с однозонным очагом деформации. Расчетные значения коэффициента уширения при значениях коэффициента трения $f = 0,05-0,45$ близки к экспериментальным данным. Разработана новая математическая модель для определения коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овалных калибрах. Методика расчета коэффициента уширения может быть использована для расчета деформации металла при производстве катанки в высокоскоростных блоках современных прокатных станов.

Ключевые слова: круглая полоса, овалный калибр, заднее натяжение, непрерывная прокатка, трение в очаге деформации.

М. М. ШТОДА**ВПЛИВ КОЕФІЦІЕНТА ТЕРТЯ НА КОЕФІЦІЕНТ РОЗШИРЕННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ КРУГЛИХ РОЗКАТІВ В ОВАЛЬНОМУ КАЛІБРІ З ЗАДНІМ НАТЯГОМ**

У статті наведені лабораторні дослідження з використанням круглих алюмінієвих і свинцевих заготовок. Діаметр заготовок становив 6,5 мм, а діаметр валків стану – 210 мм. Прокатка здійснювалася в овальному калібрі шириною 8,8 мм. Під час прокатки створювався задній натяг різної величини. Для створення різних режимів тертя в осередку деформації заготовки прокатувалися із сухою поверхнею, а також із покриттям милом або крейдою. Експериментальні дані оброблялися методами статистичного аналізу. Результати досліджень показують, що умови тертя в осередку деформації при прокатці круглих заготовок в овалних калібрах незалежно від режиму натягу та матеріалу, який виводиться, істотно впливають на величину поперечної деформації металу. У всіх досліджуваних випадках, зниження коефіцієнта тертя викликає зниження розширення, а підвищення коефіцієнта тертя – збільшує поперечну течію металу в осередку деформації. Прокатка свинцевих і алюмінієвих круглих заготовок, покритих милом, в овальному калібрі протікала з однозонним осередком деформації, тобто при негативних значеннях випередження. При цьому відомі формули для розрахунку абсолютного розширення не працюють, тому що всі вони виведені для умови наявності зони випередження. Пропонується модель враховує можливість прокатки в овальному калібрі з однозонним осередком деформації. Розрахункові значення коефіцієнта розширення при значеннях коефіцієнта тертя $f = 0,05-0,45$ близькі до експериментальних даних. Розроблено нову математичну модель для визначення коефіцієнта розширення при прокатці круглих заготовок в овалних калібрах. Методика розрахунку коефіцієнта розширення може бути використана для розрахунку деформації металу при виробництві катанки в високошвидкісних блоках сучасних прокатних станів.

Ключові слова: кругла заготовка, овалний калібр, задній натяг, неперервна прокатка, тертя в осередку деформації.

М. N. SHTODA**INFLUENCE OF FRICTION COEFFICIENT ON BROADENING COEFFICIENT DURING ROUND STRIPS ROLLING WITH BACK TENSION IN AN OVAL CALIBER**

This article describes laboratory studies performed using round aluminum and lead bars. The diameter of bars was 6.5 mm and diameter of rolls was 210 mm. The rolling was made in an oval caliber 8.8 mm wide. During rolling, back tension of various sizes was created. To create different friction modes in the deformation zone, billets were rolled with a dry surface, as well as coated with soap or chalk. Experimental data was processing by statistical analysis methods. Research results show that the friction conditions in deformation zone during rolling round bars in oval calibers affect significantly on value of the transversal deformation of metal, it is regardless of the tension mode and rolled material. In all studied cases, a decrease in the friction coefficient is causes a decrease in broadening, and an increase in friction coefficient increases the transversal flow of the metal in deformation zone. The rolling of lead and aluminum round bars coated with soap in an oval caliber proceeded with a single-area deformation zone, i.e., at negative values out-running. Moreover, the well-known formulas for calculating the absolute broadening do not work, since all of them are derived for condition when presence of outrunning area. The proposed model takes into account the possibility of rolling in an oval caliber with a single-area deformation zone. The calculated values of broadening coefficient at the values of friction coefficient $f = 0.05-0.45$ are close to experimental data. New mathematical model has been developed to determine the coefficient of broadening when rolling round bars in oval calibers. The methodology of calculate the coefficient broadening can be used to calculate metal deformation in the production of wire rod in the high-speed blocks of modern rolling mills.

Keywords: round bar, oval caliber, back tension, continuous rolling, friction in deformation zone.

Введение. Трение является одним из наиболее значительных физических явлений, влияющих на формирование металла при прокатке. Как отмечено в работе [1, с. 9], «на действии сил трения основано само существование процесса прокатки», однако существует различные точки зрения на природу трения при прокатке. Поэтому при решении задач прокатного производства залогом успеха является правильный выбор модели контактных условий

рабочего инструмента с обрабатываемым материалом. Тем не менее, «единство мнений по вопросам контактного взаимодействия не достигнуто, более того, обсуждение порой носит острый дискуссионный характер» [2, с. 57].

Анализ состояния вопроса. Исследования в работе [3] показали, что увеличение трения при

упругом контакте вызывает рост температуры и в то же время рост температуры вызывает уменьшение коэффициента трения. Отсюда понятно, что моделирование контактного взаимодействия не может быть простым и однозначным из-за сложной взаимосвязи с технологическими параметрами. О том, что процесс прокатки построен на трении и все технологические параметры находятся в тесной взаимосвязи с ним указано и работах [1, 2, 4–6]. О влиянии трения на уширение указывают авторы в работах [7–10]. В то же время другие авторы [11–14] говорят, что при сортовой прокатке, неравномерность деформации по ширине полосы, является более существенным фактором, чем трение и его влияние при расчете уширения не учитывают.

При производстве катанки в проволочном блоке трудно дать оценку влияния режима трения на поперечное течение металла особенно при прокатке с натяжением, прежде всего из-за того, что значения этих параметров в условиях высокоскоростной непрерывной прокатки определить пока не удастся.

Цель работы. Целью данной статьи является исследование влияния коэффициента трения на формоизменение круглой полосы при прокатке в овальном калибре с задним натяжением.

Постановка задачи. Современные проволочные станы, оснащенные чистовыми блоками, позволяют осуществлять процесс прокатки катанки со скоростью 100–110 м/с. При этом трудно сказать, какое значение принимает коэффициент трения на контакте полосы с твердосплавными валками. Анализ технической литературы показывает, что с увеличением скорости горячей прокатки коэффициент трения в очаге деформации снижается. В работе [17, с. 28] приведены опытные значения коэффициента трения при горячей прокатке, согласно которым он равняется 0,17 при температуре 1000 °С и скорости прокатки 2,5 м/с. В работе [18, с. 49, рис. 20] показано, что при горячей сортовой прокатке со скоростью 30 м/с и при температуре металла 1000 °С коэффициент трения составляет 0,18. В других источниках также говорится о том, что при увеличении скорости выше 30 м/с коэффициент трения мало зависит от скорости прокатки. В работе [19, с. 368] приведена зависимость коэффициента трения при горячей прокатке полос из стали марки 08кп с подачей в очаг деформации 5%-ой эмульсии масла А20 от скорости прокатки в стальных и чугунных валках. Из графика следует, что при скорости прокатки 100 м/с коэффициент трения составляет 0,1–0,13.

Отсюда видно, что предложенная Зандером формула [20, стр. 188], описывающая характер изменения коэффициента трения при скорости прокатки выше 2 м/с, позволяет определять коэффициент трения также при скорости 100–110 м/с.

Тогда при температуре 1000 °С зависимость будет иметь вид, приведенный в виде кривой на рис. 1.

Как видно из рис. 1, увеличение скорости прокатки приводит к снижению коэффициента трения, и при скорости прокатки 100–110 м/с его

теоретическое значение в зависимости от температуры конца прокатки составляет 0,19–0,21.

В результате увеличения скорости вращения валков по ходу прокатки, контактные условия в очагах деформации разных клетей чистового блока существенно отличаются. Кроме того, из литературных источников [15, 16] известно, что между клетями чистового блока на прокатываемую полосу действует удельное натяжение величина, которого не превышает 10% от истинного предела текучести.

Снижение коэффициента трения уменьшает величину поперечной деформации [17], и увеличение заднего натяжения также снижает коэффициент уширения [17]. Однако в литературе отсутствуют данные про влияние на поперечное течение металла снижения коэффициента трения на контакте между прокатываемой полосой и валками при наличии заднего натяжения.

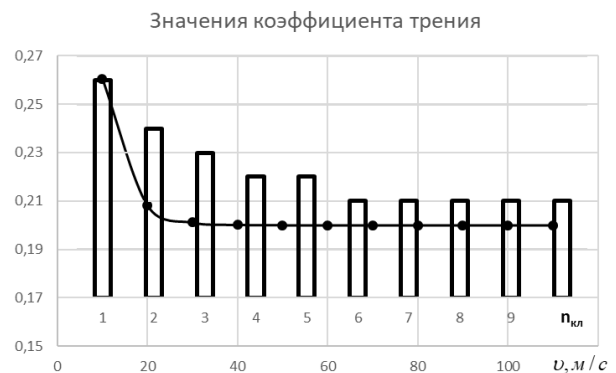


Рис. 1 – Теоретическая зависимость коэффициента трения от скорости прокатки при температуре металла 1000 °С (кривая) и распределение коэффициента трения по клетям блока при скорости катанки на выходе из него 100 м/с и температуре металла перед блоком 980 °С (диаграмма)

Методы исследований. Исследование влияния трения на формоизменение металла при непрерывной сортовой прокатке проводили в условиях лабораторного стана с диаметром валков 210 мм в овальном калибре шириной 8,8 мм. Для создания заднего натяжения использовали грузо-блочный механизм. В качестве заготовок использовали свинцовые и алюминиевые круглые полосы диаметром 6,5 мм (минимальный размер образца составил 6,44 мм, максимальный – 6,75 мм). Высоту калибра устанавливали в пределах от 3,62 мм до 3,91 мм, так чтобы степень деформации по соответственной полосе составляла 45 %.

При изучении совместного влияния заднего натяжения и трения на поперечное течение металла в очаге деформации масса грузов составляла 8 кг и 12 кг для свинцовых образцов, а для алюминиевых образцов – 56 кг.

Как известно, горячая сортовая прокатка осуществляется без смазки на поверхности заготовки, но так как в лабораторных условиях снижение коэффициента трения невозможно за счет увеличения

частоты вращения валков, режим трения при высокой скорости прокатки в очаге деформации имитировали нанесением на образец покрытия в виде мыльного порошка. В другом случае в качестве покрытия служил меловый порошок, при этом коэффициент трения искусственно завышали. Кроме того, опыты проводили, прокатывая обезжиренные образцы. Во всех случаях поверхность валков перед прокаткой очищали и обезжиривали. Предварительно, исходя из предельного обжатия, определяли для всех случаев прокатки коэффициент трения в начальный момент захвата. Его значения приведены в табл. 1.

Для наглядности, мел и мыло наносили на заднюю часть образца, при этом после прокатки отчетливо видно, как условия трения влияют на поперечное течение металла в очаге деформации. На рис. 2 показаны образцы с наиболее ярко выраженной разницей в уширении между сухой и покрытой мылом или мелом частями заготовок.

Таблица 1 – Значения коэффициента трения в опытах

Материал образца	Коэффициент трения, f		
	Покрытие образца		
	Мыльный порошок	Меловый порошок	Сухой образец
Свинец	0,07	0,43	0,28
Алюминий	0,06	0,33	0,18

Результаты экспериментальных исследований процесса прокатки круглых свинцовых и алюминиевых полос в овальном калибре при разных условиях трения и натяжения приведены на рис. 3. Здесь, σ_0 – напряжение заднего натяжения, а σ_T – предел текучести при растяжении для прокатываемого материала заготовки.



Рис. 2 – Общий вид свинцовых образцов с задней частью покрытой после прокатки: а – мелом и б – мылом

Анализ результатов исследований показывает, что условия трения в очаге деформации при прокатке круглых полос в овальных калибрах независимо от режима натяжения существенно влияют на величину поперечной деформации металла. Так, при прокатке свинцовых образцов без заднего натяжения ($\sigma_0/\sigma_T=0$) увеличение коэффициента трения в очаге деформации на 0,15 приводит к увеличению абсолютного уширения на 1,26–1,52 мм, а снижение его на 0,21 – к

уменьшению абсолютного уширения на 1,79–2,01 мм. Что при ширине калибра 8,8 мм составляет, соответственно, увеличение на 14,0–17,0 % и уменьшение на 20,0–23,0 %.

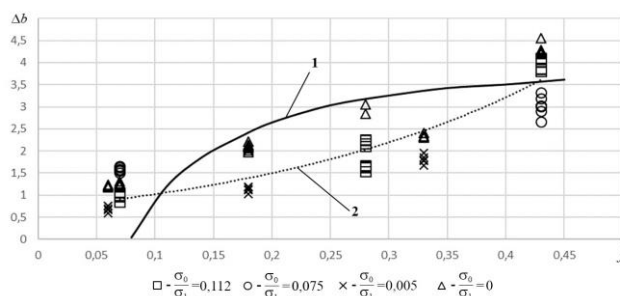


Рис. 3 – Зависимость абсолютного уширения при прокатке круглых полос в овальном калибре от коэффициента трения в очаге деформации при различных значениях напряжения заднего натяжения: 1 – кривая, построенная в соответствии с уравнением А.И. Целикова [9]; 2 – аппроксимация результатов эксперимента

При прокатке алюминиевых образцов без натяжения ($\sigma_0/\sigma_T=0$) просматривается аналогичная зависимость: при увеличении коэффициента трения на 0,15 уширение увеличивается на 0,2–0,3 мм (2,3–3,4 %) и при уменьшении его на 0,12 уширение уменьшается на 0,8–1,0 мм (9,0–11,0%).

При прокатке свинцовых круглых образцов с задним относительным натяжением $\sigma_0/\sigma_T=0,112$ (напряжение заднего натяжения 3,4 Н/мм²) увеличение коэффициента трения на контакте полосы с валками на 0,15 приводит к увеличению абсолютного уширения на 2,2–2,4 мм (25–27 %), а уменьшение коэффициента трения на 0,21 – к падению абсолютного уширения на 1,0–1,3 мм (11,0–15,0 %).

При прокатке свинцовых круглых образцов с задним относительным натяжением $\sigma_0/\sigma_T=0,075$ (напряжение заднего натяжения 2,3 Н/мм²) уменьшение коэффициента трения на 0,21 приводит к снижению абсолютного уширения на 1,1–1,7 мм (12,5–19,3 %).

При прокатке алюминиевых образцов с относительным натяжением $\sigma_0/\sigma_T=0,005$ (напряжение заднего натяжения 17 Н/мм²) увеличение коэффициента трения на контакте полосы с валками на 0,15 приводит к увеличению абсолютного уширения на 0,5–0,8 мм (5,7–9,1 %), а уменьшение коэффициента трения на 0,12 – к падению абсолютного уширения на 1,0–1,3 мм (11,0–15,0 %).

Во всех исследуемых случаях увеличение заднего натяжения приводит к снижению абсолютного уширения. Так при прокатке круглых свинцовых сухих образцов ($f=0,21$ –0,28) увеличение заднего натяжения с $\sigma_0/\sigma_T=0$ до $\sigma_0/\sigma_T=0,112$ вызывает уменьшение абсолютного уширения на 1,3–1,9 мм. При прокатке круглых свинцовых образцов, покрытых мелом ($f=0,43$), увеличение заднего натяжения с $\sigma_0/\sigma_T=0$ до $\sigma_0/\sigma_T=0,075$ уменьшает абсолютное

уширение на 1,3–1,5 мм, а при дальнейшем повышении заднего натяжения до $\sigma_0/\sigma_T=0,112$ уширение повышается на 0,8–1,1 мм, но по сравнению с сухим образцом при этом наблюдается снижение абсолютного уширения на 0,4–0,5 мм. При прокатке круглых свинцовых образцов, покрытых мылом ($f=0,07$), увеличение заднего натяжения с $\sigma_0/\sigma_T=0$ до $\sigma_0/\sigma_T=0,075$ приводит к увеличению абсолютного уширения на 0,3–0,4 мм, а дальнейшее увеличение натяжения до $\sigma_0/\sigma_T=0,112$ снижает абсолютное уширение на 0,2–0,3 мм от абсолютного уширения сухого образца.

При прокатке сухих алюминиевых образцов ($f=0,13$ – $0,18$) увеличение относительного заднего натяжения с $\square_0/\square_T=0$ до $\square_0/\square_T=0,005$ приводит к снижению абсолютного уширения на 0,8–1,2 мм. При прокатке алюминиевых образцов, покрытых мелом ($f=0,33$), увеличение относительного заднего натяжения с $\square_0/\square_T=0$ до $\square_0/\square_T=0,005$ приводит к снижению абсолютного уширения на 0,3–0,7 мм. А при прокатке алюминиевых образцов, покрытых мылом ($f=0,06$), повышение заднего натяжения до $\square_0/\square_T=0,005$ вызывает снижение абсолютного уширения на 0,4–0,6 мм.

Интересно отметить, что процессы прокатки свинцовых и алюминиевых круглых полос, покрытых мылом, в овальном калибре протекали с однозонным очагом деформации, то есть при отрицательных значениях опережения. При этом известные формулы для расчета абсолютного уширения использовать нельзя, так как все они выведены для условия наличия зоны опережения. Это хорошо видно из рис. 3 на примере теоретической зависимости по формуле Целикова [9]. Как следует из рис. 3, продольные нормальные растягивающие напряжения σ_x , возникающие в очаге деформации при $\beta > 2f$, недостаточны для появления утяжки полосы.

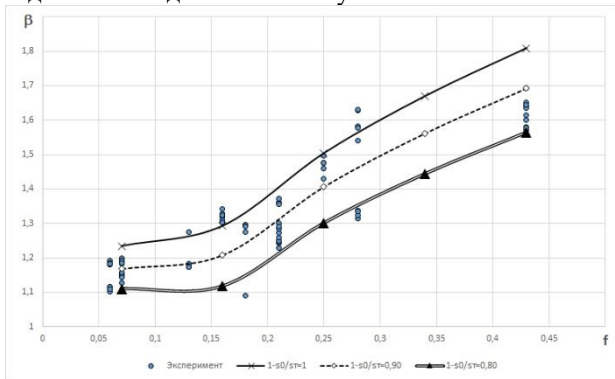


Рис. 4 – Влияние коэффициента трения на β

В работах [12, 21] приведены экспериментальные формулы для расчёта коэффициента уширения β при прокатке круглых профилей в овальных калибрах. Зависимости, полученные в работе [20] учитывают влияние заднего натяжения на поперечную деформацию прокатываемого профиля. Однако, как показывают эксперименты, описанные в данной работе, помимо заднего натяжения на числовое значение коэффициента уширения при прокатке в овальном

калибре круглых заготовок существенное влияние оказывает коэффициент трения f на контакте между прокатываемым металлом и валками, а эта зависимость в предыдущих работах не учтена.

Влияние коэффициента трения на коэффициент уширения при прокатке круглых заготовок в овальных калибрах графически показано рис. 4. Как видно, в исследуемом диапазоне влияние коэффициента трения f на поперечное течение металла в очаге деформации имеет вид близкий к параболическому. В конечном итоге получена новая зависимость, которая позволяет провести расчеты коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальном калибре:

$$\beta = k \cdot f^{0,34} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

f – коэффициент трения в очаге деформации;

$\frac{\sigma_0}{\sigma_T}$ – относительное заднее натяжение;

β_p – уширение, рассчитанное по формуле [12].

$$\beta_p = 0,943 + 0,113 \frac{h_0}{h_1} + 0,004 \frac{D_b}{h_1} + 0,014 \frac{B_k}{b_0}$$

где h_0 , h_1 – начальная и конечная высота полосы при прокатке в овальном калибре;

D_b – диаметр валков по буртам;

B_k – ширина калибра;

b_0 – ширина заготовки.

Коэффициент k_σ в соответствии с результатами работы [21] определяет по формуле:

$$\begin{cases} k_\sigma = 1 & \text{при } \frac{\sigma_0}{\sigma_T} = 0, \\ k_\sigma = 1,225 - 1,72 \frac{\sigma_0}{\sigma_T} + 1,729 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^2 & \text{при } \frac{\sigma_0}{\sigma_T} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

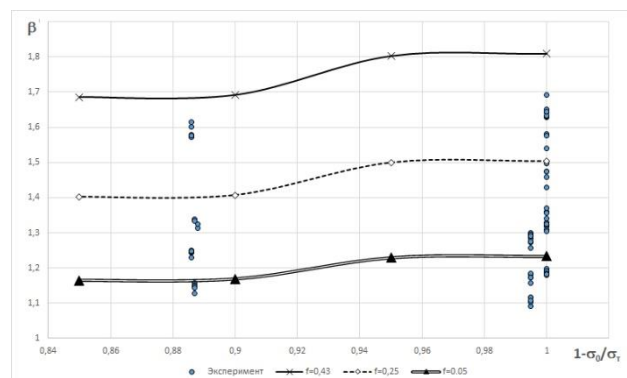


Рис. 5 – Влияние заднего натяжения на β

Однако анализ результатов исследований данной работы показывают, что в области малых значений задних натяжений лучше использовать формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = 1,7f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,95 \text{ и } f > 0,1 \\ \beta = 2,15f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,95 \text{ и } f \leq 0,1 \\ \beta = 1,6f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,85 \text{ и } f > 0,1 \\ \beta = 2,05f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,85 \text{ и } f \leq 0,1 \\ \beta = 1,49f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) < 0,85 \text{ и } f > 0,1 \\ \beta = 1,96f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) < 0,85 \text{ и } f \leq 0,1 \end{array} \right. \quad (3)$$

Сравнение расчетных значений коэффициента уширения (кривые на графиках рис. 4 и 5) с экспериментальными данными (точки на рис. 4 и 5), показывают хорошую сходимость при значениях коэффициента трения $f=0,05-0,45$. Поэтому зависимость (3) можно рекомендовать для использования при расчетах поперечной деформации металла в условиях проволочного блока при прокатке катанки в промышленных условиях.

Выводы. 1. При прокатке круглых полос в овальных калибрах без натяжения или с задним натяжением, условия трения в очаге деформации оказывают существенное влияние на величину абсолютного уширения. Это влияние соизмеримо с влиянием натяжения.

2. При прокатке круглых полос в овальных калибрах с задним натяжением или без него с увеличением коэффициента трения в очаге деформации показатели уширения полосы увеличиваются и наоборот.

3. Характер влияния условий трения и величины заднего натяжения на показатели поперечной деформации не зависит от материала прокатываемой полосы.

4. При малых значениях коэффициента трения (меньше 0,1) процесс прокатки круглых свинцовых и алюминиевых полос в овальном калибре протекает в однозонном очаге деформации. При этом, несмотря на действие продольных нормальных растягивающих напряжений в очаге деформации, наблюдается поперечное течение металла с определенным уширением полосы.

5. Получена новая зависимость коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах, в зависимости от геометрических параметров очага деформации, заднего натяжения и коэффициента трения на контакте металла с валками. Результаты работы можно рекомендовать для использования при расчетах поперечной деформации металла в условиях проволочного блока при прокатке катанки в промышленных условиях.

Список литературы

1. Грудев А.П. Влияние трения при прокатке. Москва: Металлургия, 1973. – 288 с.
2. Огинский И.К., Данченко В.Н., Самсоненко А.А., Бояркин В.В. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров. Днепрпетровск: Пороги, 2011. – 355 с. ISBN 978-617-518-161-4.
3. Franchuk, V.P., Zibrov, K.A., Krivda, V.V., Fedorchenko, S.O. Influence of thermophysical processes on the friction properties of wheel – rail pair in the contact area. Scientific Bulletin of National Mining University. 2018, Issue 2, p46-52. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/7
4. Радченко А.К., Гогаев К.А. Роль трения при несимметричной прокатке. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія Машинобудування, 2013, №67. – С. 168–173.
5. Кривенцов А.М. Разработка метода и определение на его основе коэффициента трения при горячей, теплой и холодной прокатке черных и цветных металлов. Калибровочное бюро, 2013, №6, С. 40–49.
6. Святовец К.В. Исследование формул уширения. Высшая школа, 2016, №21. – С. 68–73.
7. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. Москва: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
8. Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков. М.: Металлургиздат, 1953. матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 26(1351), 2019. – 780 с.
9. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И., Третьяков А.В., Никитин Г.С. Теория прокатки. Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
10. Ekelund S. Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling Steel. Steel. 1933, 33, P. 27–29
11. Павлов И.М., Потоскуев М.Н. Вынужденная поперечная деформация при прокатке в разрезных калибрах. Материалы по теории прокатки, 1960, №5. С. 469–481.
12. Штода М.Н., Ершов С.В., Геймур К.Г., Самохвал В.М., Гаврилин С.Ю. Уширение при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал – круг». Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 30 (1202). – С. 79–87.
13. Кинзин Д.И., Моллер А.Б., Рычков С.С. Выбор методики расчета уширения при моделировании прокатки сортовых профилей простой формы. Известия ВУЗов. Черная Металлургия. 2012, №55(10). – С. 32–35. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-10-32-35>
2. Харитонов В.А., Таранин И.В. Анализ напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при прокатке катанки в различных системах калибров на основе моделирования методом конечных элементов. Известия ВУЗов. Черная Металлургия. 2013; 56(2). – С. 26–30. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-26-30>
3. Горбанев А.А., Жучков С.М., Филиппов В.В. и др. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки. Минск: Выш. шк., 2003. – 287 с. – ISBN 985-06-0793-9.
4. Тимошпольский В.И., Андрианов Н.В., Жучков С.М. и др. Производство высокоуглеродистой катанки на металлургических агрегатах высшего технического уровня. Минск: Бел. наука, 2004. – 238 с. – ISBN 985-08-0617-6.
5. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970. – 360 с.
6. Ивонитов А.Н., Горбанев А.А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. М.: Металлургия, 1989. – 256 с.
7. Капланов В. И. Динамика и трибоника высокоскоростной тонколистовой прокатки. Мировая тенденция и перспектива: Монография Мариуполь: Изд-во «Рената», 2008. – 456 с.
8. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
9. Штода М. Н., Максименко О. П., Чудновец А. Н. Коэффициент уширения при прокатке полос в системе калибров "овал–круг" с задним удельным натяжением. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. – 2018. – Вип. Тем. вип. – С. 132–138.

References (transliterated)

1. Grudev A.P. Vliyanie treniya pri prokatke. Moscow: Metallurgiya, 1973. – 288 p.
2. Oginskiy I.K., Danchenko V.N., Samsonenko A.A., Boyarkin V.V. Protsesty deformatsii metalla na osnove mnogovalkovykh kalibrov. Dnepropetrovsk: Porogi, 2011. – 355 p. ISBN 978-617-518-161-4.
3. Franchuk, V.P., Zibrov, K.A., Krivda, V.V., Fedorchenko, S.O. Influence of thermophysical processes on the friction properties of wheel – rail pair in the contact area. Scientific Bulletin of National Mining University. 2018, Issue 2, p. 46–52. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/7
4. Radchenko A.K., Gogaev K.A. Rol treniya pri nesimmetrichnoy prokatke. Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukrainy «Kiyivskiy politekhnichniy institut» seriya Mashinobuduvannya, 2013, 67, 168–173.
5. Kriventsov A.M. Razrabotka metoda i opredelenie na ego osnove koeffitsienta treniya pri goryachey, teploy i holodnoy prokatke chernykh i tsvetnykh metalliv. Kalibrovochnoe byuro, 2013, 6, 40–49.
6. Svyatovets K.V. Issledovanie formul ushireniya. Vysshaya shkola, 2016, 21, 68–73.
7. Gubkin S.I. Teoriya obrabotki metalliv davleniem. Moskva: Metallurgizdat, 1947. – 532 p.
8. Bahtinov B.P. Kalibrovka prokatnykh valkov. Moscow: Metallurgizdat, 1953. – 780 p.
9. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I., Tretyakov A.V., Nikitin G.S. Teoriya prokatki. Spravochnik. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 335 p.
10. Ekelund S. Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling Steel. Steel. 1933, 33, P. 27–29
11. Pavlov I.M., Potoskuev M.N. Vyunuzhdennaya poperechnaya deformatsiya pri prokatke v razreznnykh kalibrah. Materialy po teorii prokatki, 1960, 5, 469–481.
12. Shtoda M.N., Ershov S.V., Geymur K.G., Samohval V.M., Gavrilin S.Yu. Ushirenne pri prokatke v kalibrah vytyazhnoy sistemy "oval – krug". Visnik Nats. tekh. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsiyni tekhnologiyi ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiyi – KHarkiv : NTU "HPI", 2016. – 30 (1202). – P. 79–87.
13. Kinzin D.I., Moller A.B., Ryichkov S.S. Vyibor metodiki rascheta ushireniya pri modelirovanii prokatki sortovykh profiley prostoy formy. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya. 2012, 55(10), 32–35. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-10-32-35>
14. Haritonov V.A., Taranin I.V. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v ochage deformatsii pri prokatke katanki v razlichnykh sistemakh kalibrov na osnove modelirovaniya metodom konechnykh elementov. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya. 2013; 56(2), 26–30. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-26-30>
15. Gorbanyov A.A., Zhuchkov S.M., Filippov V.V. i dr. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy vyiskokoskorostnoy prokatki katanki. Minsk: Vysh. shk., 2003. – 287 p. – ISBN 985-06-0793-9.
16. Timoshpolskiy V.I., Andrianov N.V., Zhuchkov S.M. i dr. Proizvodstvo vyiskokouglerodistykh katanki na metallurgicheskikh agregatakh vyisshego tekhnicheskogo urovnya. Minsk: Bel. navuka, 2004. – 238 p. – ISBN 985-08-0617-6.
17. Tselikov A.I., Grishkov A.I. Teoriya prokatki. M.: Metallurgiya, 1970. – 360 p.
18. Ivoditov A.N., Gorbanev A.A. Razrabotka i osvoenie tekhnologii proizvodstva vyiskokokachestvennoy katanki. Moscow: Metallurgiya, 1989. – 256 p.
19. Kaplanov V. I. Dinamika i tribonika vyiskokoskorostnoy tonkolistovoy prokatki. Mirovaya tendentsiya i perspektiva: Monografiya Mariupol: Izd-vo «Renata», 2008. – 456 p.
20. Henzel A., Shpittel T. Raschet energosilovyykh parametrov v protsessakh obrabotki metalliv davleniem. Moscow: Metallurgiya, 1982. – 360 p.
21. Shtoda M. N., Maksimenko O. P., Chudnovets A. N. Koeffitsient ushireniya pri prokatke polos v sisteme kalibrov "oval – krug" s zadnim udelnym natyazheniem. Zbirnik naukovih prats Dniprovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo univ'sitetu. Tekhnichni nauki. – 2018. – Vip. Tem. vip. – P. 132–138.

Поступила (received) 10.12.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Штода Максим Миколайович (Штода Максим Николаевич, Shtoda Maksim Nikolayevych) – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри ОМТ ім. Б.М. Ляковича, м. Кам'янське; тел.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.